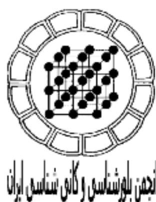
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال سی ام، شمارهٔ دوم، تابستان ۱۴۰۱، از صفحهٔ ۲۰۷ تا ۲۲۲



کاربرد شیمی کانی‌ها در بررسی کانه‌زایی و دگرسانی در کانسار روی-سرب انگوران، زنجان

ارمغان فروزش، زهرا بنیادی*

دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، دانشکده علوم پایه، گروه زمین شناسی، قزوین، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۴/۱۴، نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۷/۷)

چکیده: کانسار روی- سرب انگوران در ۱۳۵ کیلومتری غرب شهر زنجان و در شمال‌غربی پهنه ساختاری سنندج- سیرجان واقع است. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده رخداد دگرسانی دولومیتی در فرادیواره کربنات و تشکیل آنکریت در فرودیواره شیست است. میزبان اصلی کانه‌زایی سنگ کربناتی دگرگون‌شده است. دولومیت انگوران از نوع ثانویه و گرمابی است. تشکیل دولومیت ثانویه و ایجاد تخلخل فضای لازم برای جای‌گیری کانه‌های سولفیدی اسفالریت، گالن و پیریت را در سنگ میزبان کربناتی فراهم کرده است. نتایج نشان می‌دهد که اسفالریت انگوران غنی از آهن، کادمیوم و ژرمانیم بوده و گالن غنی از آنتیموان و نقره است. دمای تشکیل اسفالریت انگوران ۱۷۰-۱۹۰ درجه سانتیگراد بوده است. از مقایسه این ویژگی‌ها با سایر کانسارهای سرب و روی مشخص شد که کانسار انگوران بیشترین شباهت را به کانسارهای نوع دره می‌سی‌سی‌پی (MVT) داشته و شیمی کانی‌ها و دمای تشکیل آنها تفاوت اساسی با سایر انواع کانه‌زایی دارد.

واژه های کلیدی: *دگرسانی؛ کانه‌زایی؛ اسفالریت؛ دولومیت؛ انگوران؛ زنجان.*

مقدمه

کانسار روی و سرب انگوران در غرب استان زنجان و ۱۳۵ کیلومتری غرب شهر زنجان قرار دارد و از بزرگ‌ترین کانسارهای سولفیدی روی و سرب در ایران است. کانسار انگوران در شمال‌غربی پهنه سنندج-سیرجان واقع است. کانسنگ روی-سرب از دو بخش سولفیدی و کربناتی تشکیل شده است که به ترتیب دارای ۴٫۷ و ۱۴٫۶ میلیون تن ذخیره هستند [۲،۱]. کانسنگ سولفیدی از کانه‌های اسفالریت و گالن تشکیل شده و عیار روی و سرب در آن به ترتیب ۲۷٫۷ و ۲٫۴ درصد است. کانسنگ کربناتی از کانه‌های اسمیت‌زونیت و همی‌مورفیت تشکیل شده و عیار روی و سرب در آن به ترتیب ۲۲ و ۴٫۶ درصد است [۳]. بر اساس بررسی‌های پیشین در معدن روی و سرب انگوران، انواع مختلفی چون کانسار نوع دره می‌سی‌سی‌پی (MVT) [۲-۴]، سولفید توده‌ای (VMS) [۵]، بروندمی-رسوبی (SEDEX) [۷،۶] و نوع روی-سرب دما پایین با سنگ میزبان کربناتی [۸] برای آن در نظر گرفته شده است. از آنجا که انواع مطرح شده دارای تفاوت‌های بسیاری در ساخت و بافت کانسنگ، ماهیت سنگ میزبان، مجموعه دگرسانی و زمین شیمی کانه‌ها و کانی‌های دگرسانی هستند، بررسی این موارد می‌تواند به یافتن خاستگاه واقعی کانسار انگوران کمک نماید. نوع کانی‌های دگرسانی و کانه‌ها و عناصر اصلی و فرعی موجود در آنها برای انواع مختلف کانه‌زایی متفاوت است و بررسی آنها می‌تواند به تشخیص شرایط تشکیل کانسار کمک نماید. دمای تشکیل و شرایط فیزیکوشیمیایی محیط تشکیل کانسار را می‌توان بر پایه شیمی کانی‌ها تعیین کرده و ابهام‌های موجود در این زمینه را رفع کرد.

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۲۸۳۳۹۰۱۳۱۵، نمابر: ۰۲۸۳۳۷۸۰۰۴۰، پست الکترونیکی: bonyadi@sci.ikiu.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.2.8]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.207]

مجموعه‌های دگرسانی پیرامون بسیاری از کانسارها گسترش دارند و کشف آن‌ها بسیار آسان‌تر از کانسنگ‌های درون آنهاست [۹]. ماهیت کانه‌ها و کانی‌های دگرسانی به عوامل مختلفی بستگی دارد که از آن جمله می‌توان به خاستگاه و ویژگی‌های سیال کانه‌دار و دما و فشار در مرحله کانه‌زایی و دگرسانی اشاره کرد. پیشتر پژوهش‌هایی پیرامون سیال‌های درگیر و شیمی کانی اسفالریت در کانسار انگوران انجام شده [۲، ۸]، ولی در هیچ یک از آنها به کانی‌های دگرسانی موجود اشاره نشده است. در این پژوهش افزون بر شیمی کانی اسفالریت و گالن، شیمی کانی‌های دگرسانی نیز در نظر گرفته شده است. در اینجا با بررسی عناصر اصلی و فرعی موجود در کانه‌ها و کانی‌های دگرسانی در معدن روی و سرب انگوران و همچنین مقایسه شباهت و ویژگی‌های کانسار انگوران با انواع کانسارها، دگرسانی‌های در ارتباط با کانه‌زایی و شرایط کانه‌زایی و دگرسانی، برای نزدیک شدن هرچه بیشتر به نوع کانسار انگوران شناسایی می‌شود.

زمین‌شناسی

کانسار روی و سرب انگوران در پهنه ساختاری سنندج- سیرجان و نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ تخت سلیمان [۱۰] قرار دارد. پهنه سنندج- سیرجان با طول حدود ۱۵۰۰ کیلومتر و روند شمال‌غربی- جنوب شرقی و با عرض ۲۰۰-۱۵۰ کیلومتر موازی با کمربند کوهزایی زاگرس گسترش دارد [۱۱]. منطقه تخت سلیمان بخشی از منطقه فلززایی تکاب بوده و بیشتر از سنگ‌های دگرگونی شیست، مرمر، گنیس و آمفیبولیت تشکیل شده است. این سنگ‌ها، به صورت ناپیوسته توسط رسوب‌های الیگو-میوسن پوشیده شده‌اند [۱۰]. قدیمی‌ترین واحد شناخته شده در منطقه مورد بررسی مجموعه‌ای از سنگ‌های دگرگونی، میکاشیست و کوارتزیت به رنگ سبز- خاکستری است که در زیر یک افق ۵۰ تا ۱۰۰ متری آهک و دولومیت مرمری شده در هسته تاقدیس‌هایی در کوه لعل‌کان و کوه گورگور و تاقدیس چوگنی نمایان شده‌اند. این سنگ‌های دگرگونی شامل سریسیت- موسکویت شیست، کوارتز- کلریت- اپیدوت شیست، بیوتیت شیست و میان‌لایه‌های کوارتزیت (ماسه‌سنگ‌های آرکوزی و گریوکی دگرگون شده) دارای رخساره شیست سبز هستند [۱۰،۱۲].

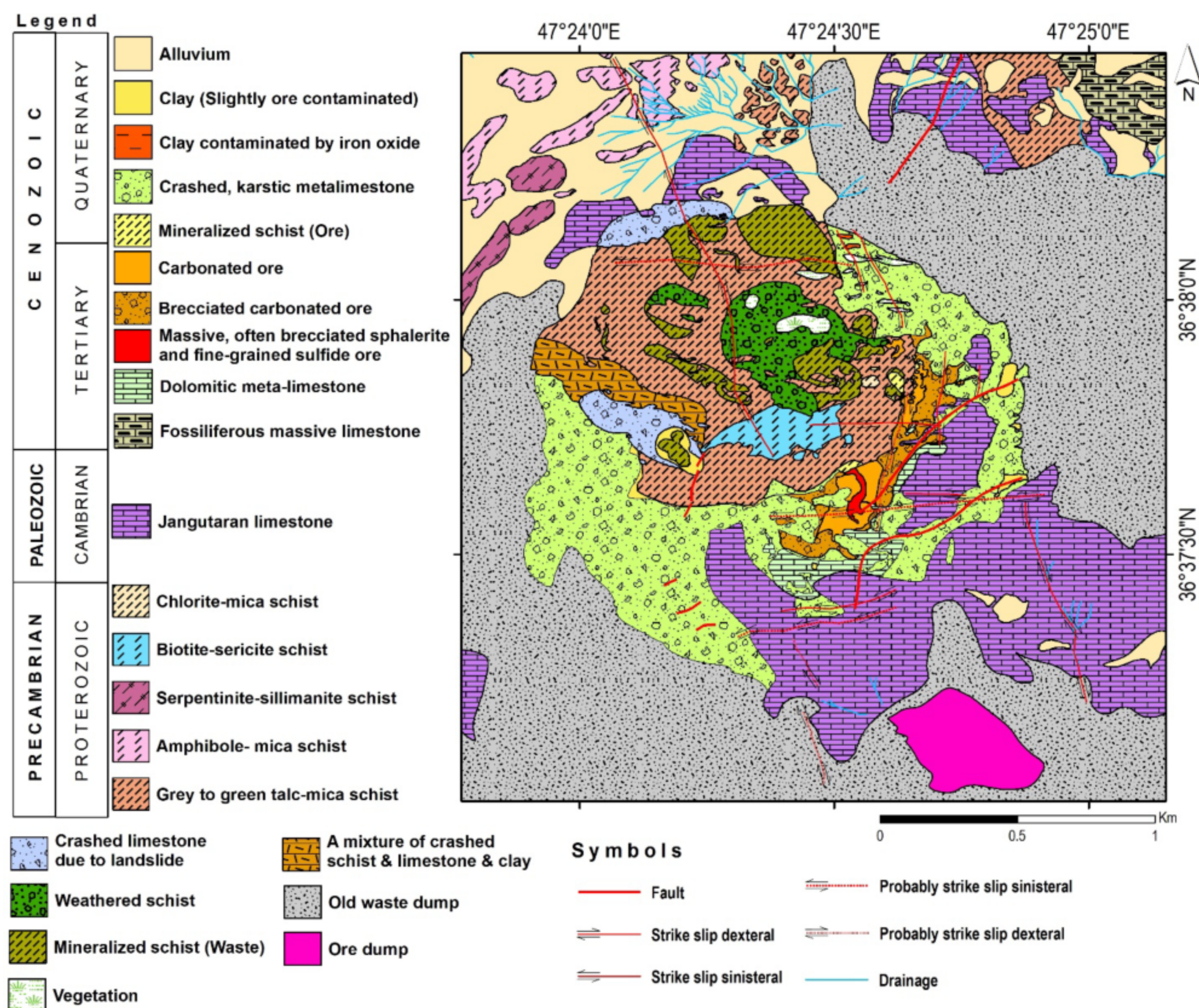
کانسار انگوران در میان فرادیواره‌ای از مرمر و فرودیواره‌ای از شیست تشکیل شده است (شکل۱). روی سنگ‌های میکاشیست و فرامافیک‌های دگرگون شده، یک واحد ستبر مرمر و دولومیت خاکستری روشن تا خاکستری تیره با لایه‌بندی متوسط تا ضخیم به ضخامت ۵۰ تا ۳۰۰ متر قرار دارد که مناطق مرتفعی در بخش‌های میانی منطقه ایجاد کرده است. این واحد مرمر جانگوتاران نامگذاری شده است [۱۰] که بخش فرادیواره معدن انگوران را تشکیل می‌دهد. مرمر ضخیم انگوران میزبان توده معدنی اصلی است که در افق بالایی مجموعه دگرگونی قرار دارد و توسط سازند قرمز پایینی پوشیده شده است [۱۳]. کانه‌زایی در بخش فرادیواره شامل کانسنگ کربناتی به‌صورت حجم زیادی از کربنات روی (اسمیت‌زونیت) و همچنین کانسنگ سولفیدی است. بخش فرودیواره شیست کانسار انگوران که در زیر افق مرمر انگوران نمایان است، شامل کوارتز- سریسیت شیست و کوارتز- موسکویت شیست بوده و در اثر فرآیندهای فشارشی دچار تغییر شکل شده است. سن این سنگ‌ها را به پرکامبرین پسین-کامبرین پیشین نسبت می‌دهند [۱۲]. بخش کمی از کانه‌زایی سولفیدی در فرودیواره شیست دیده می‌شود.

کانسار انگوران با شکلی سه‌گوشه، توسط سه گسل شمال‌غربی، شمال‌شرقی و جنوب‌غربی کنترل می‌شود که این سه گسل توزیع ماده معدنی را در گودال کنترل می‌کنند [۸].

نمونه‌برداری و روش‌های آزمایشگاهی

از نمونه‌های برداشت شده طی بازدید صحرایی از بخش‌های روباز، زیرزمینی و همچنین از مغزه‌های حفاری معدن انگوران تعداد ۱۱ مقطع نازک و ۳۴ مقطع نازک- صیقلی برای بررسی-های میکروسکوپی تهیه گردید.

تعداد ۳ نمونه با پراش‌سنج پرتوی ایکس (XRD) فیلیپس مدل PW1730 تجزیه شدند. ریزتجزیه ۲۶ نقطه از نمونه‌ها به روش ریزپردازش الکترونی (EPMA) با دستگاهJEOL JXA-8230 با ولتاژ شتاب‌دهنده ۲۰ kV و جریان ۱۵ nA در مرکز تحقیقات و برنامه علوم زمین دانشگاه آنکارا انجام شد. داده‌های تجزیه شیمیایی با نرم‌افزارهای اکسل و GCDkit پردازش و رسم شدند.



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی کانسار انگوران (برگرفته از مرجع [۱۴] با تغییرات جزئی).

نتایج

کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانسنگ

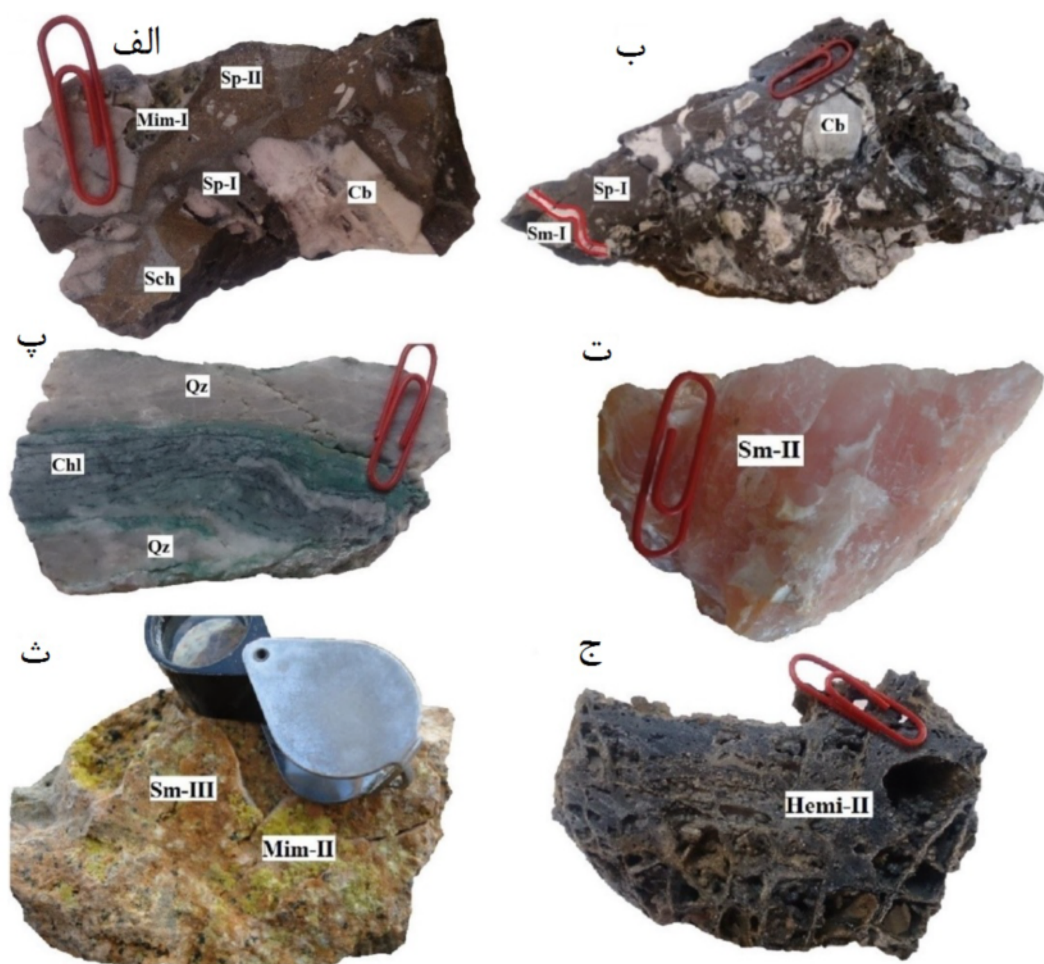
براساس بازدیدهای صحرایی، کانه‌زایی در کانسار روی و سرب انگوران، کانه‌زایی طی دو مرحله‌ی درونزاد و برونزاد رخ داده است. کانه‌زایی درونزاد به صورت رگه- رگچه‌هایی از پیریت نسل اول درون سنگ میزبان شیست آغاز شده است. در ادامه روند کانه‌زایی سولفیدی، کانه‌های سولفیدی چون اسفالریت‌های نسل اول و دوم، پیریت‌های نسل دوم و سوم، گالن‌های نسل اول و دوم و به مقدار کمتر آرسنوپیریت به صورت توده‌ای، رگه‌ای، گل‌کلمی، جانشینی و پرکننده فضای خالی تشکیل شده‌اند (شکل ۲ الف) است. این فاز از کانه‌زایی موجب ایجاد ساخت و بافت برشی در سنگ میزبان کربناتی و شیست شده است. ادامه روند کانه‌زایی درونزاد در معدن انگوران به صورت یک فاز کربناتی بیشتر شامل اسمیت‌زونیت است که به صورت توده‌ای و رگه- رگچه‌ای باعث قطع و برشی‌-شدن کانه‌زایی پیش از خود شده که در نمونه دستی قابل مشاهده است (شکل ۲ ب). در بخش‌های شیست فرودیواره معدن انگوران، کلریت به رنگ سبز در نمونه‌های دستی دیده می‌شود (شکل ۲ پ).

ادامه روند کانه‌زایی در معدن انگوران به‌صورت فاز برونزاد رخ داده است. عملکرد فاز برونزاد در معدن انگوران موجب تشکیل ذخایر غنی از عنصرهای روی و سرب بیشتر به صورت اسمیت‌زونیت در بخش‌های بالایی این معدن شده است. تجزیه و اکسایش کانسنگ سولفیدی در معدن انگوران موجب تشکیل کربنات روی برونزاد به‌صورت یک پوشش شده است [۸]. این بخش غنی‌شده در نمونه‌های دستی به صورت سه نسل متفاوت

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.2.8]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.207]

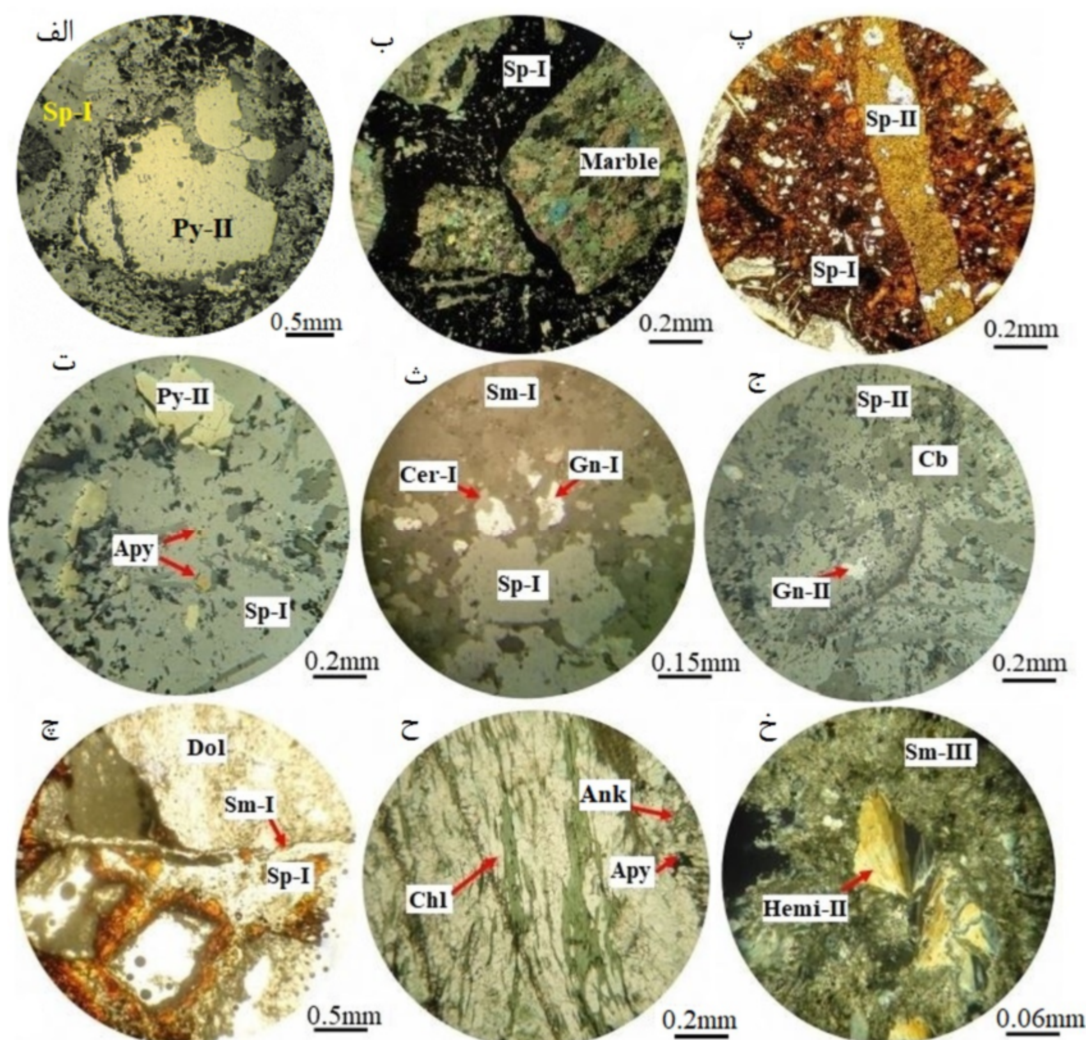
از اسمیت‌زونیت شامل اسمیت‌زونیت صورتی رنگ (شکل ۲ت)، اسمیت‌زونیت پر عیار قهوه‌ای رنگ و اسمیت‌زونیت کم عیار سفید رنگ به صورت گل کلمی و توده‌ای در ارتباط با کربنات‌های فرادیواره (شکل ۲ ث) است و به همراه میمتیت به‌صورت بلورهای سوزنی (شکل ۲ ث) و همی‌مورفیت با ساخت جعبه‌ای (شکل ۲ ج) دیده می‌شود.

بررسی‌های میکروسکوپی نشان‌دهنده تشکیل کانه‌های سولفیدی در بخش درونزاد به‌صورت پیریت‌های نسل دوم با بافت توده‌ای (شکل ۳ الف) و پیریت‌های نسل سوم به‌صورت دانه پراکنده، دو نسل متفاوت از اسفالریت‌ها به صورت اسفالریت نسل اول غنی از آهن به رنگ قهوه‌ای تیره و بیشتر با بافت توده‌ای و اسفالریت‌های نسل دوم فقیر از آهن به رنگ عسلی با بافت گل کلمی و رگه‌ای است که اسفالریت‌های نسل اول را قطع کرده‌اند (شکل‌های ۳ ب و پ). همچنین آرسنوپیریت به‌صورت توده‌ای (شکل ۳ ت)، گالن‌های نسل اول همراه با اسفالریت نسل اول (شکل ۳ ث) و گالن‌های نسل دوم (شکل ۳ ج) همراه با اسفالریت نسل دوم به‌صورت دانه پراکنده تشکیل شده‌اند. در ادامه کانه‌زایی درونزاد، در نتیجه تأثیر رگه کربناتی بر کانسنگ سولفیدی، سروزیت نسل اول به‌صورت جانشینی پیرامون گالن نسل اول (شکل ۳ ث) تشکیل شده است.



شکل ۲ الف: نمونه دستی کانسنگ درونزاد انگوران شامل شیست، اسفالریت، کربنات و میمتیت. ب: سنگ میزبان کربناتی برشی شده طی کانی‌زایی سولفیدی. اسفالریت در میان قطعه‌های سنگ میزبان کربناتی نهشته شده و رگه اسمیت‌زونیت درونزاد باعث قطع‌شدگی کانسنگ سولفیدی پیش از خود شده است. پ: شیست فرودیواره دربردارنده کلریت همراه با رگه کوارتز، مربوط به بخش زیرزمینی معدن انگوران ت: اسمیت‌زونیت صورتی رنگ برونزاد. ث: میمتیت به رنگ سبز مایل به زرد همراه با اسمیت‌زونیت . ج: ساخت جعبه‌ای در همی‌مورفیت برونزاد؛ (Sch: شیست، Sp: اسفالریت، Cb: کربنات، Mim-I: میمتیت درونزاد، Mim-II: میمتیت برونزاد، Sm-I: اسمیت‌زونیت درونزاد، Sm-II: اسمیت‌زونیت صورتی رنگ برونزاد، Sm-III: اسمیت‌زونیت نسل سوم برونزاد، Chl: کلریت، Qz: کوارتز، Hemi-II: همی‌مورفیت برونزاد [۱۵]).

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.2.8]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.207]



شکل ۳ تصویر میکروسکوپی از الف: پیریت نسل دوم به‌صورت توده‌ای همراه با اسفالریت نسل اول، (نور بازتابی)، ب: کانه‌زایی اسفالریت نسل اول در فرادیواره کربنات که موجب قطع و برشی شدن سنگ میزبان خود شده است. (نور عبوری قطبیده متقاطع XPL)، پ: اسفالریت نسل دوم به صورت رگه که اسفالریت نسل اول را قطع کرده است، (نور عبوری قطبیده صفحه‌ای، PPL.)، ت: آرسنوپیریت همراه با پیریت نسل دوم (نوربازتابی). ث: سروزیت نسل اول که در لبه گالن نسل اول به صورت جانشینی تشکیل شده است، (نور بازتابی)، ج: گالن نسل دوم همراه با اسفالریت نسل دوم (نور بازتابی)، چ: دولومیت‌های ریز بلور، متراکم و بی‌شکل و اسمیت‌زونیت رگه‌ای نسل اول که باعث قطع شدگی اسفالریت نسل اول پیش ازخود شده است، (نور عبوری PPL)، ح: رگه کلریت در شیست فرودیواره همراه با آرسنوپیریت و آنکریت، (نور عبوری PPL) و. خ: بلورهای اسمیت‌زونیت نسل سوم در کنار کانی همی‌مورفیت نسل دوم به‌صورت شعاعی (نور عبوری XPL) (Py-I: پیریت نسل اول، Sp-I: اسفالریت نسل اول، Apy: آرسنوپیریت، Cer-I: سروزیت نسل اول، Gn-I: گالن نسل اول، Sp-II: اسفالریت نسل دوم، Gn-II: گالن نسل دوم، Sm-I: اسمیت‌زونیت درونزاد، Sm-II: اسمیت‌زونیت نسل دوم برونزاد، Sm-III: اسمیت زونیت نسل سوم برونزاد، Hemi-II: همی‌مورفیت نسل دوم و Dol: دولومیت [۱۵].

کانی‌های کربناتی بخش درونزاد معدن انگوران شامل اسمیت‌زونیت، کلسیت و دولومیت هستند. در بسیاری از سنگ‌های کربناتی، دولومیت و کلسیت با هم دیده می‌شوند [۱۶]. در معدن انگوران، دولومیت در فرادیواره مرمر به صورت ریز بلور، متراکم و بی‌شکل از نوع نامنظم A است (شکل ۳ چ).

ترکیب دولومیت‌ها اغلب نزدیک به فرمول $CaMg(CO_3)_2$ است، اما بسیاری از دولومیت‌ها به جای منیزیم، مقداری آهن دارند [۱۶]. گروه دولومیت شامل دولومیت $CaMg(CO_3)_2$، آنکریت $CaFe(CO_3)_2$ و کوتناهوریت $CaMn(CO_3)_2$ است [۱۷]. در دولومیت جانشینی آهن با منیزیم، باعث تشکیل

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.2.8]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.207]

آنکریت با فرمول شیمیایی $Ca(Mg,Fe,Mn)(CO_3)_2$ می‌شود. آنکریت یک دولومیت دارای آهن با نسبت $Fe^{2+}/(Mg+Fe^{2+})$ بزرگتر و یا مساوی با ۰/۲ در نظر گرفته می‌شود. واژه دولومیت آهن‌دار برای کانی‌هایی با ترکیب حدواسط بین آنکریت و دولومیت استفاده می‌شود [۱۶]. در فرودیواره شیست معدن روی و سرب انگوران، جانشینی آهن با منیزیم باعث تشکیل آنکریت به‌صورت ریزبلور و بی‌شکل شده است (شکل ۳ ح).

کانی‌های برونزاد تشکیل شده در معدن روی و سرب انگوران شامل اسمیت‌زونیت درشت بلور نسل دوم با بافت گل کلمی، اسمیت‌زونیت‌های متوسط بلور نسل سوم با بافت گل کلمی، همی‌مورفیت (شکل ۳ خ)، بلورهای سوزنی میمتیت، سروزیت نسل دوم و سرانجام مخلوطی از کانی‌های سیلیکاتی و کربناتی روی (کالامین) هستند.

شیمی کانی‌ها

کربنات‌ها

با توجه به شناسایی اسمیت‌زونیت و کانی‌های دولومیت و آنکریت در بررسی‌های میکروسکوپی، برای تعیین ماهیت سیال‌های سازنده این کانی‌ها، دگرسانی، چگونگی و محیط تشکیل، تجزیه زمین‌شیمیایی نمونه‌ها به روش ریزپردازش الکترونی (EPMA) انجام شد (جدول ۱).

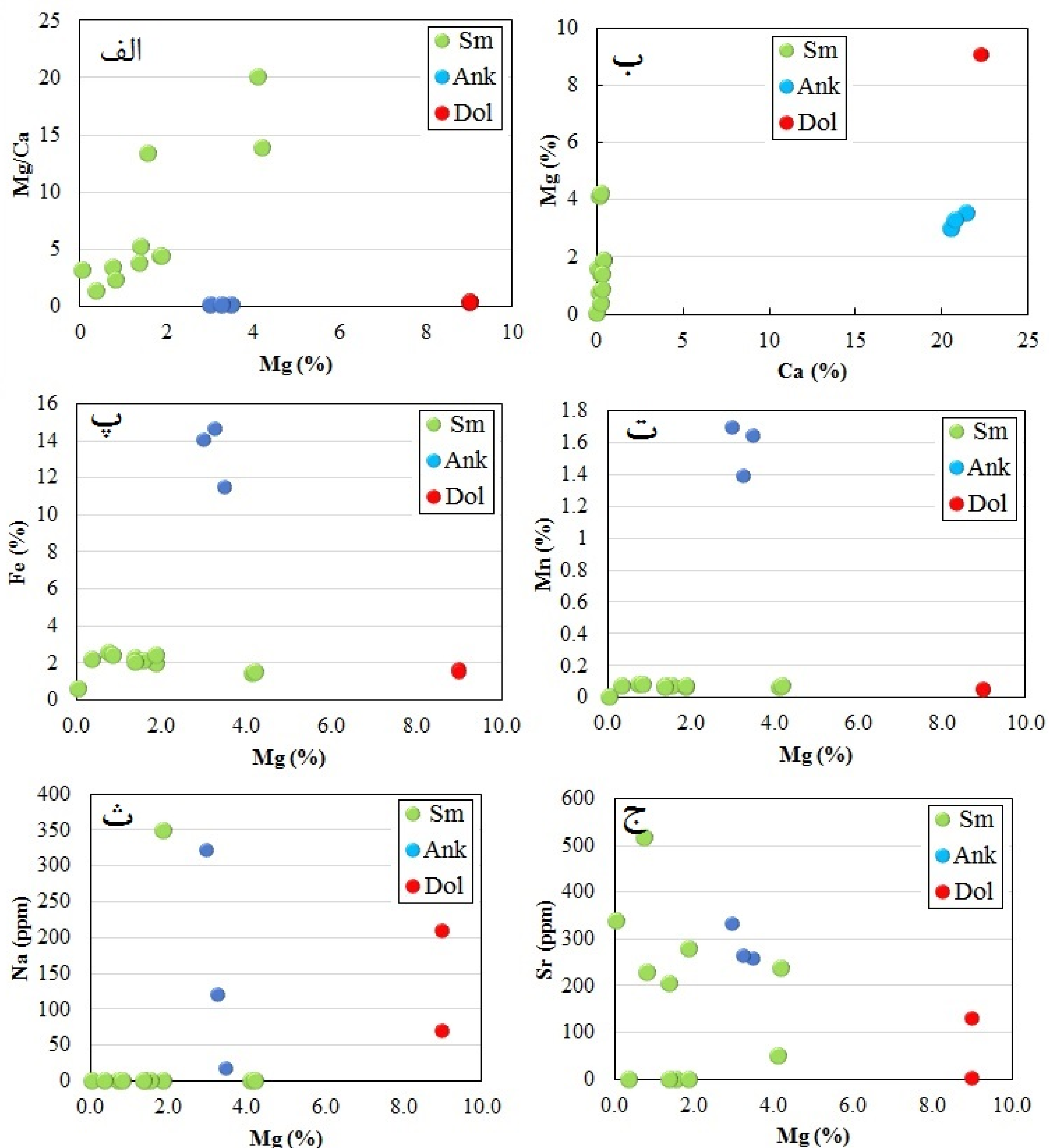
مقدار Mg در دولومیت فرادیواره انگوران برابر با ۹ درصد وزنی و در آنکریت فرودیواره انگوران ۳، ۳/۳ و ۳/۵ درصد است. نسبت Mg/Ca در دولومیت فرادیواره برابر با ۰/۴ درصد و در آنکریت‌های فرودیواره ۰/۲ و ۰/۱ درصد است (شکل ۴ الف). مقدار Ca در دولومیت فرادیواره برابر با ۲۲/۳ و ۲۲/۴ درصد وزنی و در آنکریت‌های فرودیواره معدن انگوران ۲۰/۹۴، ۲۰/۸ و ۲۱/۴ درصد است (شکل ۴ ب).

جدول۱ مقادیر اکسیدهای عناصر اصلی و جزئی به‌دست آمده از EPMA کانی‌های کربناتی فرادیواره و فرودیواره معدن انگوران. (Sm: اسمیت‌زونیت نسل اول، Dol: دولومیت، Ank: آنکریت [۱۵]).

Sample	Mineral	Mg (%)	Ca (%)	Fe (%)	Zn(%)	Mn (ppm)	Na (ppm)	Sr (ppm)	Mn/Sr	Mg/Ca
A5-1-1	Sm	۰/۰	۰/۰	۰/۶	۴۹/۶	۰/۰	۰/۰	۳۳۸/۲	۰/۰	۳/۲
A5-1-2	Sm	۴/۱	۰/۲	۱/۵	۳۸/۷	۶۲۷/۳	۰/۰	۵۰/۷	۱۲/۴	۲۰/۰
A5-1-3	Sm	۱/۹	۰/۴	۱/۹	۴۴/۲	۶۶۶/۱	۰/۰	۲۷۹/۰	۲/۴	۴/۳
A5-1-4	Sm	۴/۲	۰/۳	۱/۵	۳۸/۶	۷۲۰/۳	۰/۰	۲۳۶/۸	۳/۰	۱۳/۹
A5-1-5	Sm	۰/۷	۰/۲	۲/۶	۴۴/۶	۷۷۴/۵	۰/۰	۵۱۵/۸	۱/۵	۳/۴
A5-2-1	Sm	۰/۴	۰/۳	۲/۲	۴۵/۹	۷۲۰/۳	۰/۰	۰/۰	–	۱/۳
A5-2-2	Sm	۱/۴	۰/۳	۲/۳	۴۳/۳	۶۸۱/۶	۰/۰	۲۰۲/۹	۳/۴	۵/۲
A5-2-3	Sm	۱/۶	۰/۱	۲/۱	۴۳/۵	۶۷۳/۸	۰/۰	۰/۰	–	۱۳/۴
A5-3-1	Sm	۱/۹	۰/۴	۲/۴	۴۱/۸	۷۴۳/۵	۳۴۸/۷	۰/۰	-	۴/۳
A5-3-2	Sm	۰/۸	۰/۴	۲/۴	۴۴/۱	۸۳۶/۵	۰/۰	۲۲۸/۳	۳/۷	۲/۲
A5-3-3	Sm	۱/۴	۰/۴	۲/۰	۴۳/۷	۶۵۸/۳	۰/۰	۰/۰	-	۳/۸
A5-4-1	Dol	۹/۰	۲۲/۴	۱/۶	۰/۰	۴۱۰/۵	۶۶/۸	۰/۰	–	۰/۴
A5-4-2	Dol	۹/۰	۲۲/۳	۱/۵	۰/۰	۴۶۴/۷	۲۰۷/۷	۱۲۶/۸	۳/۷	۰/۴
C22-1	Ank	۳/۰	۲۰/۵	۱۴/۰	۰/۰	۱۶۸۶۰/۹	۳۱۹/۰	۳۲۹/۸	۵۱/۱	۰/۱
C22-2	Ank	۳/۵	۲۱/۴	۱۱/۴	۰/۰	۱۶۳۰۳/۲	۱۴/۸	۲۵۳/۷	۶۴/۳	۰/۲
C22-3	Ank	۳/۳	۲۰/۸	۱۴/۶	۰/۰	۱۳۸۴۰/۳	۱۱۸/۷	۲۶۲/۱	۵۲/۸	۰/۲

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.2.8]

[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.207]



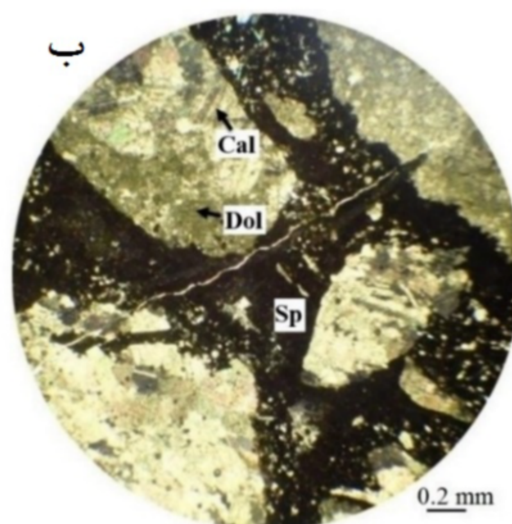
شکل ۴ نمودارهای الف: تغییرات Mg/Ca نسبت به Mg در کربنات‌های معدن انگوران، ب: تغییرات Mg نسبت به Ca، پ: تغییرات Fe نسبت به Mg، ت: تغییرات Mn نسبت به Mg، ث: تغییرات Na نسبت به Mg و ج: تغییرات Sr نسبت به Mg در کربنات‌های معدن انگوران. (Dol: دولومیت، Ank: آنکریت، Sm: اسمیت‌زونیت [۱۵]).

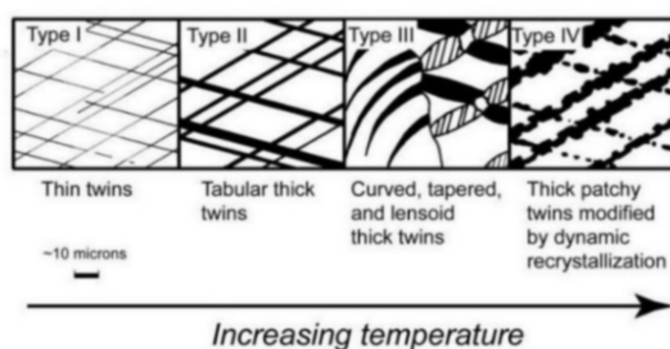
مقدار Fe در دولومیت فرادیواره انگوران برابر با ۱/۵ و ۱/۶ درصد وزنی و در آنکریت فرودیواره معدن انگوران ۱۱/۴، ۱۴ و ۱۴/۶درصد است (شکل ۴ پ). مقدار Mn نیز در دولومیت فرادیواره برابر با ۰/۰۴۳ درصد وزنی و در آنکریت فرودیواره

معدن انگوران ۱٫۱۴ و ۱٫۶۵ است (شکل ۴ ت). مقدار بالای آهن و منگنز در گروه دولومیت معدن انگوران نشان‌دهنده ثانویه بودن دولومیت‌ها و تشکیل آنها در شرایط احیایی است. مقدار Na در دولومیت فرادیواره انگوران برابر با ۶۶٫۸ و ۲۰۷٫۷ppm و در آنکریت فرودیواره معدن انگوران ۱۴٫۸، ۱۱۸٫۷ ۳۱۹ppm است (شکل ۴ ث). فراوانی Sr نیز در دولومیت فرادیواره برابر با ۱۲۶٫۸ppm و در آنکریت فرودیواره برابر با ۲۵۳٫۷، ۲۶۲٫۱ و ۳۲۹٫۸ ppm است (شکل ۴ ج).

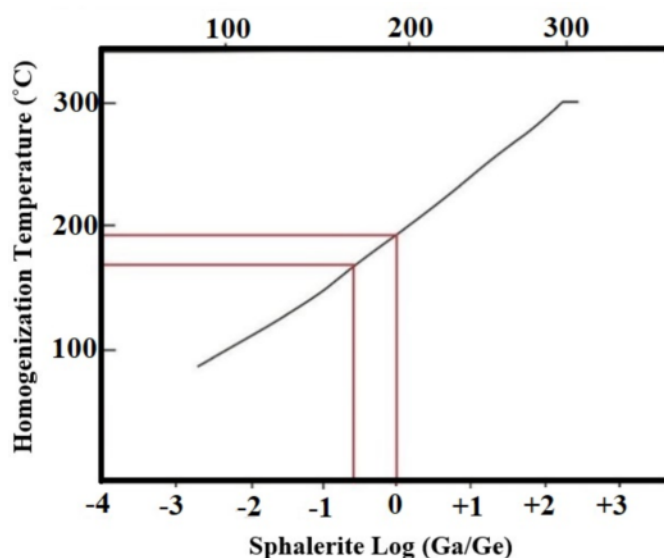
همچنین در کنار نتایج به دست آمده از بررسی مقادیر عناصر اصلی و فرعی در دولومیت‌های فرادیواره انگوران، شاهد تغییرات کانی‌شناسی از کلسیت دارای ماکل تیغه‌ای به دولومیت هستیم. از آنجا که ضخامت ماکل تیغه‌ای در کلسیت رابطه مستقیمی با افزایش دما دارد، به‌طوری که ماکل‌های تیغه‌ای نازک‌تر در دمای کمتر از ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد و ماکل‌های تیغه‌ای ضخیم در دمای بالای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد دیده می‌شوند (شکل ۵ الف)، دمای بیش از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد یک سازوکار مهم در بازتبلور و تغییر شکل کلسیت است [۱۸]. براساس شواهد بیان شده، می‌توان گفت که تغییرات کانی‌شناسی از کلسیت به دولومیت در فرادیواره معدن روی و سرب انگوران (شکل ۵ ب)، می‌تواند در نتیجه فعالیت‌های گرمابی در یک شرایط احیایی باشد [۱۹].

تشکیل اسمیت‌زونیت درونزاد پیرامون دولومیت‌های فرادیواره معدن انگوران را می توان در مقاطع میکروسکوپی دید. با توجه به نتایج EPMA برای اسمیت‌زونیت‌ها (جدول ۱)، مقادیر سدیم در ده نمونه از اسمیت‌زونیت‌ها صفر است، که می‌تواند دلیل بر تأثیر و دخالت آب‌های جوی در تشکیل این چهار نمونه از اسمیت‌زونیت‌ها باشد. این در حالی است که مقدار سدیم در اسمیت‌زونیت نمونه A5-3-1 برابر با ۳۴۸٫۷ppm بوده (شکل ۶ B) و نزدیک به شوری سیال تشکیل‌دهنده دولومیت در معدن انگوران است. می‌توان گفت که این نوع اسمیت‌زونیت نخست به صورت یک فاز میانی با نام زینسین دولومیت تشکیل شده است. زینسین دولومیت‌ها دارای غنی‌شدگی قابل توجهی از عنصر روی هستند. بر اثر جانشینی Zn به جای Mg، شبکه دولومیت ناپایدار شده و سرانجام اسمیت‌زونیت در پیرامون کانی دولومیت رسوب می‌کند [۲۰].





شکل ۵ الف: طرحواره‌ای از اثر دما بر تغییر شکل ماکل و ضخامت آن در کلسیت [۱۹]، ب: تصویر میکروسکوپی در نور XPL از نمونه فرادیواره معدن روی و سرب انگوران که نشان‌دهنده تغییر کانی‌شناسی از کلسیت دارای ماکل تیغه‌ای به دولومیت است. (Cal: کلسیت، Dol: دولومیت، Sp: اسفالریت [۱۵]).



شکل ۶ نمودار دمای همگن‌شدگی نسبت به لگاریتم Ga/Ge برای اسفالریت‌های معدن انگوران که نشان‌دهنده دمای ۱۷۰ - ۱۹۰ °C است. بر گرفته از مراجع [۲۲،۲۱]).

شیمی و زمین‌دماسنجی اسفالریت

اسفالریت از کانه‌های اصلی تشکیل‌دهنده کانسنگ معدن انگوران است. این کانه در معدن انگوران دارای بافت‌های توده‌ای، گل کلمی، رگه‌ای و گاهی پرکننده فضای خالی است. اسفالریت به دلیل توان جانشینی بالای عنصر Zn به‌راحتی می‌تواند تعداد زیادی از عناصر را در ساختار خود جای دهد و از این رو برای بررسی‌های عنصری مناسب است [۲، ۲۳]. در بررسی‌های میکروسکوپی و EPMA بر اسفالریت‌های انگوران (جدول۲)، اسفالریت نسل اول غنی از آهن (Sp-I) و نسل دوم فقیر از آهن (Sp-II) شناسایی شدند. آهن اصلی‌ترین عنصر قابل جانشینی به جای روی در اسفالریت است. این جانشینی در کانی اسفالریت موجب رنگ تیره‌تر در اسفالریت غنی از آهن می‌شود [۲۴]. مقدار آهن در اسفالریت‌های نسل اول انگوران از ۶/۶۳۲ تا ۱۰/۰۹۷ درصد و در اسفالریت‌های نسل دوم از ۱/۴۳۵ تا ۴/۲۵۵ درصد وزنی متغیر است. کادمیوم نیز به دلیل شباهت شعاع یونی آن با روی، می تواند جانشین این عنصر شود. در اسفالریت‌های انگوران، مقدار Cd از ۲۲۴۰ تا ۶۷۹۰ پی‌پی‌ام متغیر است. به جز یک نمونه، کادمیوم سایر اسفالریت‌ها بیش از ۵۰۰۰ پی‌پی‌ام است. ژرمانیوم از دیگر عناصر مهم در اسفالریت است. در اسفالریت‌های انگوران، مقدار Ge از ۷۰ تا ۴۳۰ پی‌پی‌ام متغیر است. مقدار این عناصر اغلب در نسل اول اسفالریت‌های انگوران بالاتر است.

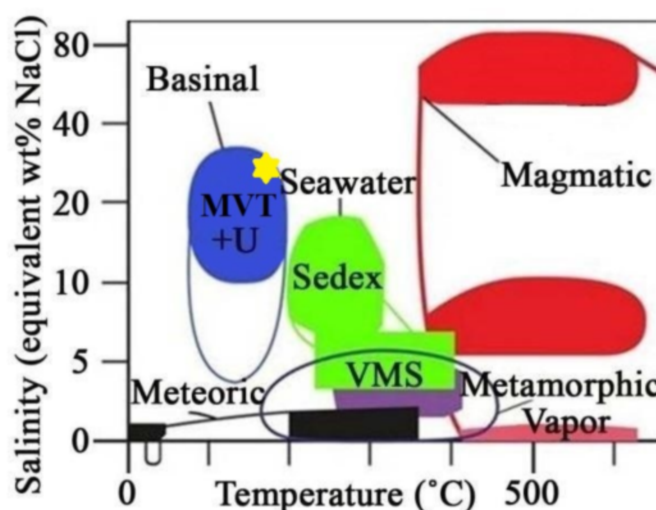
نسبت Ga/Ge در اسفالریت می‌تواند در ارتباط با دمای سیال‌های اولیه باشد که با نسبت‌های متفاوت با هم مخلوط شده و اسفالریت را تشکیل داده‌اند. مقدار آمیختگی دو سیال را می‌توان به طور کیفی از دمای همگن‌شدگی در فشار اصلاح شده (دما پس از مخلوط شدن مایعات) به‌دست آورد. دمای به دست آمده از لگاریتم نسبت Ga/Ge اسفالریت نشانگر دمای سیال‌های گرمابی اولیه دارای فلز است [۲۱، ۲۲]. برای دماسنجی اسفالریت‌های معدن انگوران از نمودار Log Ga/Ge نسبت به دمای همگن‌شدگی میانبارهای سیال در کانی اسفالریت [۸] استفاده شد (شکل ۶). دمای به دست آمده از این نمودار برابر با ۱۷۰ تا ۱۹۰ °C است. با جایابی این دما در نمودار دما نسبت به شوری سیال‌های درگیر [۸] (شکل ۷)، کانسار انگوران در گستره کانسارهای نوع دره می‌سی‌سی‌پی (MVT) قرار می‌گیرد.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.2.8]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.207]

جدول ۲ نتایج EPMA برای نمونه‌های اسفالریت معدن انگوران (بر حسب درصد وزنی).

Elements	Sp-II-1	Sp-II-2	Sp-II-3	Sp-I-1	Sp-I-2	Sp-I-3	Sp-I-4
As	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۸	۰	۰	۰	۰	۰٫۰۰۶
Ni	۰٫۰۸۶	۰٫۱۵۲	۰	۰	۰٫۱۰۳	۰	۰٫۰۳۹
Cu	۰٫۰۱۲	۰٫۰۰۳	۰	۰	۰٫۰۴۴	۰	۰
Co	۰	۰	۰٫۳۵۵	۰٫۰۱۵	۰٫۳۴۷	۰٫۱۱۱	۰٫۲۱۳
Se	۰٫۱۰۳	۰	۰	۰٫۰۷۶	۰	۰٫۱۰۲	۰٫۰۲۱
Ga	۰٫۰۰۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۰۰۹
Ge	۰٫۰۱۶	۰	۰٫۰۰۷	۰٫۰۴۳	۰٫۰۰۹	۰٫۰۳۱	۰٫۰۱۵
Fe	۴٫۲۵۵	۱٫۴۳۵	۱٫۶۸۱	۷٫۰۰۶	۱۰٫۰۹۷	۶٫۶۳۲	۹٫۵۰۵
Cd	۰٫۲۲۴	۰٫۵۸۸	۰٫۶۷۹	۰٫۵۶۹	۰٫۵۳۸	۰٫۶۲۳	۰٫۵۴۶
Pb	۰	۰	۰	۰	۰	۱٫۵۱	۰
Ag	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۴	۰	۰٫۰۵۷	۰٫۰۴۱	۰٫۰۶۸	۰٫۰۲۳
Sn	۰٫۰۰۶	۰	۰٫۰۲۶	۰٫۰۴	۰	۰	۰٫۰۰۸
Sb	۰	۰	۰٫۰۰۵	۰٫۰۴۳	۰٫۰۱۲	۰٫۰۰۵	۰
In	۰٫۰۰۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰
S	۳۱٫۱۵۹	۳۰٫۶۸۱	۳۰٫۹۰۲	۳۱٫۴۳۱	۳۱٫۸۰۱	۲۹٫۹۵۴	۳۱٫۵۹
Zn	۵۵٫۰۶۲	۵۷٫۱۴۹	۵۷٫۳۳۲	۵۱٫۸۳۲	۴۹٫۴۷۵	۵۰٫۵۹۲	۴۹٫۶۲۵
Total*	۹۰٫۹۳۱	۹۰٫۰۲	۹۰٫۹۸۷	۹۱٫۱۱۲	۹۲٫۴۶۷	۸۹٫۶۲۸	۹۱٫۵۸۵

*به دلیل استفاده از استانداردهای متنوع و اندازه‌گیری عناصر (به جای اکسیدها)، جمع کل در نتایج EPMA سولفیدها کمتر از ۱۰۰ درصد وزنی به دست می‌آید.



شکل ۷ دمای همگن‌شدگی به دست آمده از کانسارهای MVT، VMS، SEDEX نسبت به شوری میانبارهای سیال [۲۶،۲۵]. ستاره زرد نشان‌دهنده گستره میانگین دمای بدست آمده از اسفالریت‌های معدن روی و سرب انگوران (۱۸۰ درجه سانتی‌گراد) نسبت به میانگین شوری (۳۱ درصد وزنی NaCl، [۸]) در نسل‌های مختلف اسفالریت‌های به‌دست آمده از معدن انگوران است.

شیمی گالن

نتایج تجزیه سه نقطه از گالن‌های معدن انگوران در جدول ۳ ارائه شده است. در گالن‌های انگوران، مقدار بالای Sb (بیش از ۸ درصد وزنی) و Ag (بیش از ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام) دیده می‌شود. این دو عنصر اهمیت بسیاری در شیمی گالن دارند. نقره عنصر مهمی از نظر اقتصادی است و نسبت به سایر عناصر جزئی، پس از آنتیموان فراوانی بیشتری دارد. نقره با توجه به شعاع یونی نزدیک به سرب، می‌تواند جانشین این عنصر شود، ولی میزان این جانشینی بستگی به حضور عناصر دیگری چون آنتیموان دارد [۲۷]. سایر عناصر جزئی در این کانی فراوانی چندانی ندارند.

بحث

ترکیب عناصر اصلی و فرعی در دولومیت‌ها به ترکیب سیال‌های دولومیت‌ساز و ترکیب عنصری کانی‌های کربناتی که دولومیت جانشین آن‌ها می‌شود، بستگی دارد [۲۸]. تمرکز Ca و Mg در دولومیت‌ها به نسبت Mg/Ca در سیال‌ها وابسته است. دولومیت‌های غنی از منیزیم از محلول‌های با نسبت Mg/Ca بالا و دولومیت‌های غنی از کلسیم از محلول‌های با نسبت پایین Mg/Ca تشکیل می‌شوند [۲۹]. با کاهش شوری سیال‌ها و کاهش نسبت Mg/Ca، بلورهای دولومیت درشت‌تر می‌شوند [۳۰]. با توجه به مقدار کمتر منیزیم نسبت به کلسیم در دولومیت و آنکریت انگوران، می‌توان نتیجه گرفت که این کانی‌ها از محلول‌های با نسبت پایین Mg/Ca تشکیل شده‌اند.

مقادیر آهن و منگنز در دولومیت بیشتر نشانگر پتانسیل اکسایش-کاهش (Eh) محیط است، به طوری که مقدار این عناصر در دولومیت‌های تدفینی و گرمابی که در شرایط احیایی قرار دارند، بیشتر است [۳۱-۳۳]. تمرکز عناصر Fe و Mn در دولومیت‌های ثانویه بیش از دولومیت‌های اولیه است که این می‌تواند به دلیل کم بودن مقادیر Fe و Mn در آب دریا نسبت به سیال درونزادی و یا تمرکز بالای Fe و Mn در شرایط احیایی موجود در دولومیت‌های گرمابی باشد [۳۴-۳۶]. دولومیت‌های اولیه به علت برقراری شرایط اکسایش در نزدیکی سطح، دارای آهن و منگنز کمی هستند [۳۷].

مقدار Na در دولومیت به عنوان نشانه‌ای از شوری سیال‌های دولومیت‌ساز در نظر گرفته می‌شود [۳۱]. مقدار سدیم (Na) در دولومیت‌های عهد حاضر ۱۰۰ تا ۲۵۰۰ppm است. مقادیر Na در دولومیت‌های دریایی با شوری بسیار بالا مانند بافین‌بی و خلیج‌فارس، بسیار بالا و در پهنه مخلوط (آب دریا با آب‌های جوی زیرسطحی) چون باهاما، هوپ‌گیت و باربادوز، پایین است [۲۸]. پایین بودن مقدار سدیم در دولومیت معدن انگوران می‌تواند بیانگر شوری پایین سیال تشکیل‌دهنده آن باشد.

از عوامل مهم کنترل‌کننده مقدار استرانسیم (Sr) در دولومیت‌ها، ضریب توزیع Sr بین دولومیت و سیال‌های گرمابی و میانبارهای باقی‌مانده از کربنات‌های اولیه است [۳۱]. در دولومیت‌های عهد حاضر، مقدار Sr بین ۱۵۰ تا ۳۵۰۰ppm است [۲۸]. دولومیت‌های اولیه (همزاد) مقدار Sr بالاتری نسبت به دولومیت‌های ثانویه دارند [۳۷]. عنصر Sr به دلیل جایگزینی دشوار در دولومیت نسبت به کلسیت، تهی‌شدگی قابل توجهی از خود طی فرآیند گرمابی نشان می‌دهد [۳۸]. این تهی‌شدگی در نمونه دولومیت فرادیواره و نمونه آنکریت فرودیواره شیست انگوران دیده می‌شود که به احتمال بسیار ناشی از جایگزینی دشوار استرانسیم در دولومیت طی فرآیند گرمابی است (جدول ۱).

جدول۳ نتایج EPMA برای نمونه گالن A5-3-Gn1 فرادیواره معدن انگوران (برحسب درصد وزنی).

As	Cu	Co	Fe	Pb	Ag	Sb	Hg	Sn	In	S	Zn	Total
۰/۰۰۳	۰/۰۱۴	۰	۰/۰۳۷	۶۸/۸۶۲	۰/۱	۸/۰۹۴	۰	۰/۰۰۲	۰	۱۵/۷۳۶	۰/۷۶۱	۹۳/۶۰۹
۰	۰/۰۳	۰	۰/۰۴	۶۸/۳۹۹	۰/۲۱۹	۱۰/۴۹۵	۰/۰۲۹	۰	۰/۰۰۹	۱۶/۱۶۶	۱/۳۳۴	۹۶/۷۲۱
۰/۰۰۴	۰/۰۳۹	۰/۱۱۱	۰/۰۳۷	۶۸/۸۳۱	۰/۱۳۵	۹/۱۳۶	۰/۰۲۳	۰	۰/۰۰۸	۱۵/۷۱۵	۰/۶۹۱	۹۴/۷۳

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.2.8]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.207]

تشکیل دولومیت‌های ثانویه با ایجاد تخلخل و اجازه عبور حجم بیشتری از سیال [۳۷]، نقش مهمی در کانه‌زایی سیال‌های کانه‌دار دارد. براساس نتایج تجزیه‌های زمین‌شیمیایی برای دولومیت انگوران غنی‌شدگی از عناصر آهن و منگنز، تشکیل کانی‌هایی چون پیریت، آرسنوپیریت، گالن همراه با دولومیت و همچنین تهی‌شدگی قابل توجه از عناصر استرانسیوم و سدیم، می‌توان گفت که دولومیت ثانویه در معدن روی و سرب انگوران در نتیجه فعالیت‌های گرمابی اغلب در ارتباط با گسل‌ها و شکستگی‌ها شکل گرفته است [۴۰،۳۹]. با ورود محلول غنی از آهن و منیزیم و فقیر از سیلیس به سنگ کربناتی، دگرسانی دولومیتی ایجاد می‌شود. کانی دولومیت در سنگ اولیه و دولومیت‌های گرمابی تشکیل شده مایل به جذب آهن محلول دارد، بنابراین Ca از ساختار دولومیت خارج و جای خود را به Fe می‌دهد [۴۱]. دولومیت و آنکریت توسط سیالی با نسبت پایین Mg/Ca تشکیل شده‌اند. نمونه دولومیت در فرادیواره مرمر از نوع نامنظم A است، که دولومیت‌هایی ریزبلور، متراکم و بی‌شکل هستند. از جانشینی بخشی از منیزیم موجود در دولومیت با آهن، آنکریت شکل می‌گیرد. در مقاطع میکروسکوپی، آنکریت به‌صورت ریزبلور و بی‌شکل دیده می‌شود.

شرایط احیایی و غنی بودن سیال، موجب غنی‌شدگی دولومیت انگوران از عناصر آهن و منگنز شده است. سیال حوضه‌ای با عبور از مناطق عمیق‌تر و سرد شدن باعث تشکیل و یا جایگزینی دولومیت‌های ثانویه در شرایط احیایی شده [۳۷] و زمینه را برای افزایش تخلخل در سنگ میزبان و کانه‌زایی سولفیدی در فرادیواره کربنات و فرودیواره شیست معدن روی و سرب انگوران فراهم کرده‌اند. تخلخل و فضای خالی ثانویه ایجاد شده در نتیجه تشکیل این دولومیت‌ها و آنکریت‌های ثانویه به ترتیب ۱۲٪ و ۶٪ است [۴۲]. دولومیت‌های ثانویه اغلب در ارتباط با ذخایر از نوع دره می‌سی‌سی‌پی (MVT) و با انباشت اقتصادی ذخایر سرب و روی همراه هستند. تشکیل این دولومیت‌ها بیشتر در ارتباط با سیال‌هایی است که در کانه‌زایی بعدی نقش دارند [۳۷].

جایگزینی روی در ساختار دولومیت و تشکیل زینسین دولومیت سرانجام منجر به شکل‌گیری اسمیت‌زونیت شده است. مقدار MgO در برخی از اسمیت‌زونیت‌های انگوران به ۷ درصد وزنی می‌رسد. بر پایه بررسی‌های بنی و همکاران [۳]، مقادیر ایزوتوپ کربن سنگین در اسمیت‌زونیت‌های درونزاد نسل اول مشابه تراورتن‌های برآمده از چشمه‌های آب گرم منطقه تکاب بوده که این نشان‌دهنده خاستگاه مشترک این کربنات‌هاست. همچنین اسمیت‌زونیت‌های درونزاد نسل اول شامل عناصر جیوه،کبالت، مولیبدن، آنتیموان و به‌ویژه آرسنیک هستند. این عناصر در نهشته تراورتن موجود در منطقه و چشمه آب گرم تخت سلیمان یافت شده‌اند که این نشان‌دهنده خاستگاه مشترک و گردش سیال‌های گرمابی در مقیاس منطقه‌ای است.

مقدار Ge در اسفالریت کانسارهای سولفید توده‌ای و اسکارن کمتر از ۱۰ پی‌پی‌ام بوده، در حالی‌که در کانسارهای MVT بیش از ۱۰ پی‌پی‌ام است. فراوانی این عنصر در اسفالریت‌های انگوران ۸۰ تا ۲۰۰ پی‌پی‌ام است و گاهی تا ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام نیز می‌رسد. از سوی دیگر مقدار منگنز در اسفالریت‌های اسکارن، فراگرمایی و سولفید توده‌ای (VMS) بیش از ۱۰۰ پی‌پی‌ام و در اسفالریت‌های MVT کمتر از ۱۰۰ پی‌پی‌ام بوده این مقدار که در اسفالریت انگوران کمتر از ۱۰۰ پی‌پی‌ام [۲] است.

در میان اسفالریت‌های در ارتباط با انواع مختلف کانسارهای سرب و روی، بیشترین مقدار Cd (بیش از ۲۳۰۰ پی‌پی‌ام) مربوط به اسفالریت کانسارهای MVT است. فراوانی این عنصر در اسفالریت‌های VMS کمتر از ۱۵۰۰ پی‌پی‌ام و در اسفالریت‌های سدکس کمتر از ۲۰۰۰ پی‌پی‌ام است. فراوانی کادمیوم در اسفالریت‌های انگوران ۵۹۵۰ تا ۴۰۶۰۰ پی‌پی‌ام است. از سوی دیگر، مقدار کادمیوم با دمای سیال کانه‌دار در ارتباط است. با افزایش دمای محلول، مقدار کادمیوم در اسفالریت کاهش می‌یابد. بیشتر بودن مقدار کادمیوم در اسفالریت‌های MVT با توجه به کمتربودن دمای تشکیل کانسارهای MVT در مقایسه با کانسارهای سدکس و VMS (شکل ۷) قابل توجیه است. این با دمای پایین به دست آمده از

زمین‌دماسنجی اسفالریت‌های انگوران (۱۷۰-۱۹۰ درجه سانتیگراد، شکل ۶) و دمای سیال‌های درگیر [۸] همخوانی دارد. برای اسفالریت‌های کانسارهای MVT دیگر در ایران و سایر نقاط دنیا چون دره‌زنجیر [۴۳]، گوشفیل [۲۷]، موپینگ [۴۵،۴۴] و هودهنگ [۴۶] نیز ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و دمایی مشابهی با اسفالریت انگوران وجود دارد که تاییدی بر شباهت پیدایشی این کانسارهاست.

فراونی بالای عناصر Sb و Ag در گالن انگوران می تواند ناشی از وجود محلول جامد $AgSbS_2$-Pbs باشد. چنین شرایطی برای کانسار MVT موپینگ در چین نیز گزارش شده [۴۵] که در آن، مقدار Sb بیش از ۳ درصد و Ag بیش از ۱۳۰۰ پی‌پی‌ام است.

با توجه به وجود مجموعه ساده کانی‌شناسی شامل نسل‌های مختلف اسفالریت غنی از آهن و اسفالریت فقیر از آهن (جدول ۳)، گالن با Sb و Ag بالا، دگرسانی گرمابی دولومیتی و آنکریتی و قرار داشتن حجم اصلی کانه‌زایی در سنگ میزبان کربناتی، دمای پایین کانه‌زایی (با میانگین ۱۸۰ درجه سانتیگراد) و شباهت‌های شیمی سولفیدها در کانسار انگوران با سایر کانسارهای MVT، می‌توان این کانسار را از نوع MVT دانست.

بر خلاف همه کانسارهای سرب و روی، در ترکیب شیمیایی سیال‌های تشکیل‌دهنده ذخایر MVT، مقدار عنصر Si بسیار پایین، مقادیر Mg و Fe بالا و مقدار Mn قابل توجه است. مقدار منیزیم بالا به تشکیل انواع مختلف دولومیت‌های گرمابی منجر می‌شود. مهم‌ترین دگرسانی همراه با کانی‌زایی در این نوع ذخایر دولومیتی شدن است. همچنین مقدار آهن بالا در محلول به تشکیل دولومیت‌های آهن‌دار، اسفالریت‌های آهن‌دار و آنکریت منجر می‌شود [۴۱]. این شرایط به روشنی در کانسار انگوران دیده می‌شود.

کانه‌زایی در سنگ میزبان به شکل جانشینی و پرکننده فضای خالی رخ داده است. به علت وارد شدن آهن محلول در ساختار دولومیت؛ مقدار کمی آهن برای واکنش با گوگرد و تشکیل پیریت باقی مانده و بخش عمده گوگرد برای کانه‌زایی اسفالریت و گالن مصرف شده است. از آنجا که آهن تمایل دارد در ساختار اسفالریت جانشین روی شود، اسفالریت‌های آهن‌دار نیز تشکیل شده‌اند [۴۱].

نبود بافت‌های دگرگونی در سولفیدها و حفظ منطقه‌بندی و میانبارهای سیال اولیه در اسفالریت نشان می‌دهد که کانسنگ سولفیدی، دگرگونی سنگ میزبان را تجربه نکرده است [۴]. بنابراین کانسنگ سولفیدی انگوران نمی‌تواند به عنوان کانه‌زایی همزاد نوع سدکس یا VMS رده‌بندی شود. این نتیجه‌گیری با سن جوان مدل ایزوتوپ سرب [۴] و دمای پایین کانه‌زایی تایید می‌شود. همبرزایی به نسبت ساده، فقیر بودن از آهن (مقدار پیریت کم)، بافت‌های باقی‌مانده کانی‌های سولفاتی و به ویژه ویژگی‌های سیال‌ها (شوراب‌های غنی از کلسیم با دمای همگن‌شدگی ۱۰۰ تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، [۸]) تایید می‌کند که کانسنگ سولفیدی معدن انگوران از نوع MVT است.

برداشت

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در معدن روی و سرب انگوران، حجم اصلی کانه‌زایی در سنگ میزبان کربناتی رخ داده و دگرسانی دولومیتی عاملی برای تسهیل روند کانه‌زایی بوده است. دولومیت در فرادیواره مرمر و آنکریت در فرودیواره شیست به‌صورت ریز بلور، متراکم و بی‌شکل و از نوع ثانویه هستند. تخلخل و فضای خالی ایجاد شده در نتیجه تشکیل این کانی‌ها شرایط لازم برای ته‌نشست کانی‌های سولفیدی را فراهم نموده است.

دولومیت معدن روی و سرب انگوران با غنی‌شدگی از عناصر Fe و Mn و کاهش قابل توجه مقادیر Sr همراه است. این ویژگی‌های بافتی و زمین‌شیمیایی نشان‌دهنده گرمابی بودن دولومیت‌هاست. ترکیب شیمیایی سیال‌های دگرسان‌کننده و کانه‌زا در انگوران شباهت بسیاری به ذخایر MVT دارد.

اسفالریت در دو نسل فقیر از آهن و غنی از آهن تشکیل شده است. مقدار Ge و Cd در اسفالریت‌های انگوران شبیه اسفالریت در سایر کانسارهای MVT در ایران و جهان است و با اسفالریت‌های کانسارهای VMS، سدکس، اسکارن و فراگرمایی تفاوت اساسی دارد. زمین‌دماسنجی اسفالریت انگوران دمای ۱۷۰-۱۹۰ درجه سانتیگراد را به دست می‌دهد

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.2.8]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.207]

که کمتر از دمای تشکیل کانسارهای VMS و سدکس است و با دمای تشکیل کانسارهای MVT همخوانی دارد.

ویژگی‌های زمین‌شیمیایی گالن به ویژه عناصر Sb و Ag نیز در کانسار انگوران شبیه سایر کانسارهای MVT است.

به طور کلی، تشکیل حجم اصلی کانه‌زایی در سنگ میزبان کربناتی، دگرسانی دولومیتی، وجود گسل راندگی کنترل‌کننده کانه‌زایی، وجود بافت و ساخت‌های برشی، گل کلمی و پرکننده فضای خالی، شیمی کانی‌های دولومیت، اسفالریت و گالن و دمای پایین کانه‌زایی نشانگر ژنز نوع MVT برای کانسار انگوران هستند.

مراجع

[1] Gilg H.A., Boni M., Balassone G., Allen C.R., Banks D., Moore F., *"Marble-hosted sulfide ores in the Angouran Zn-(Pb–Ag) deposit, NW Iran: interaction of sedimentary brines with a metamorphic core complex"*, Mineralium Deposita 41 (2006) 1–16.

[2] Zhuang L., Song Y., Liu Y., Fard M., Hou Z., *"Major and trace elements and sulfur isotopes in two stages of sphalerite from the world-class Angouran Zn–Pb deposit, Iran: Implications for mineralization conditions and type"*, Ore Geology Reviews 109 (2019) 184–200.

[3] Boni M., Gilg H.A., Balassone G., Schneider J., Allen C.R., Moore F., *"Hypogene Zn carbonate ores in the Angouran deposit, NW Iran"*, Mineralium Deposita 42 (2007) 799–820.

[4] Gilg H.A., Allen C., Balassone, G., Boni, M., Moore, F., *"The 3-stage evolution of the Angouran Zn "oxide"-sulfide deposit, Iran"*, Mineral Exploration and Sustainable Development. Millpress, Rotterdam (2003) 77–80.

[5] Maanijou M., *"Proterozoic metallogeny of Iran"*, in: International Symposium on the Metallogeny of Precambrian Shields, Kiev, 2002: pp. 13–26.

[6] Annels A.E., O'Donovan G., Bowles M., *"New ideas concerning the genesis of the Angouran Zn–Pb deposit, NW Iran"*, 26th Mineral Deposits Studies Group, University of Leicester, Leicester (2003) 11–12.

[7] Ebrahimi M.H., Aftabi A., Mohamadi Niaei R., *"Structural, textural, mineralogical and geochemical features and the pattern of the Angoran ore deposit in the Sedex-VMS-MVT triangle"*, Iranian Journal of Petrology 1 (2010) 1–10.

[8] Daliran F., Pride K., Walther J., Berner Z.A., Bakker R.J., *"The Angouran Zn (Pb) deposit, NW Iran: evidence for a two stage, hypogene zinc sulfide–zinc carbonate mineralization"*, Ore Geology Reviews 53 (2013) 373–402.

[9] Guilbert J.M., Park C.F., *"The geology of ore deposits"*, Waveland Press, 2007.

[10] Babakhani A.R., Ghalamghash J., *"Geological map of Takht-e-Soleiman., scale 1: 100,000."*, (1990).

[11] Shahbazi H., Siebel W., Ghorbani M., Pourmoafee M., Sepahi A.A., Abedini M.V., Shang C.K., *"The Almogholagh pluton, Sanandaj-Sirjan zone, Iran: geochemistry, U-(Th)-Pb titanite geochronology and implications for its tectonic evolution, Neues Jahrbuch Für Mineralogie–Abhandlungen"*. Journal of Mineralogy and Geochemistry 192 (2015) 85–99.

[12] Ghorbani M., Economic geology of Iran, Springer, 2013.

[13] Sharafi A., Ardejani F.D., Rezaei B., Sargheini, J., *"Environmental geochemistry of near-neutral waters and mineralogy of zinc and lead at the Angouran non-sulphide zinc mine, NW Iran"*, Journal of Geochemical Exploration 186 (2018) 77–93.

[14] Rahimi H., *"Geological Map of Angouran Mine, scale 1: 2000"*, (2016).

[15] Whitney D.L., Evans B.W., *"Abbreviations for names of rock-forming minerals"*, American Mineralogist 95 (2010) 185–187.

[16] Deer W.A., *"Rock-forming minerals: Non-silicates, volume 5B"*, in: Geological Society of London, 1998.

[17] Fleischer, M., Wilcox, R. E., Matzko, J. J., *"Microscopic determination of the nonopaque minerals"*, US Government Printing Office, 1984.

[18] Ferrill D.A., Morris A.P., Evans M.A., Burkhard M., Groshong Jr, R. H., Onasch, C. M., *"Calcite twin morphology: a low-temperature deformation geothermometer"*, Journal of Structural Geology 26 (2004) 1521–1529.

[19] Burkhard M., *"Calcite twins, their geometry, appearance and significance as stress-strain*

markers and indicators of tectonic regime: a review", Journal of Structural Geology 15 (1993) 351–368.

[20] Gholizadeh K., Rasa I., Yazdi M., Boni M., *"Mineralogy and geochemistry of Zincian-dolomite in Bahramtaj deposit, Yazd, Central Iran",* Iranian J Crystallography Mineral 27 (2019) 925–940.

[21] Viets J.G., Hopkins R.T., Miller B.M., *"Variations in minor and trace metals in sphalerite from mississippi valley-type deposits of the Ozark region; genetic implications",* Economic Geology 87 (1992) 1897–1905.

[22] Monteiro L.V.S., Bettencourt J.S., Juliani C., de Oliveira T.F., *"Geology, petrography, and mineral chemistry of the Vazante non-sulfide and Ambrósia and Fagundes sulfide-rich carbonate-hosted Zn–(Pb) deposits, Minas Gerais, Brazil",* Ore Geology Reviews 28 (2006) 201–234.

[23] Mladenova V., Valchev S., *"Ga/Ge ratio in sphalerite from the carbonate-hosted Sedmochislenitsi Deposit as a temperature indication of initial fluids"*, Review of the Bulgarian Geological Society 59 (1998) 49–54.

[24] Möller P., *"Correlation of homogenization temperatures of accessory minerals from sphalerite-bearing deposits and Ga/Ge model temperatures",* Chemical Geology 61 (1987) 153–159.

[25] Wilkinson J.J., *"Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits",* Lithos. 55 (2001) 229–272.

[26] Hajalilou B., Aghazadeh, M., *"Fluid Inclusion Studies on Quartz Veinlets at the Ali Javad Porphyry Copper (Gold) Deposit, Arasbaran, Northwestern Iran",* Journal of Geoscience and Environment Protection 4 (2016) 80–91.

[27] Saboori M., Karimpour M.H., Malekzadeh Shafaroudi A., *"Mineralogy, ore chemistry, and fluid inclusion studies in Gushfil Pb-Zn deposit, Irankuh mining district, SW Isfahan",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 26 (2019) 857–870. https://doi.org/10.29252/ijcm.26.4.857.

[28] Adabi M.H., *"Sedimentary Geochemistry",* Arianzamin, Tehran, 2012.

[29] Kaczmarek S.E., Sibley D.F., *"On the evolution of dolomite stoichiometry and cation order during high-temperature synthesis experiments: an alternative model for the geochemical evolution of natural dolomites",* Sedimentary Geology 240 (2011) 30–40.

[30] Folk R.L., Land L.S., *"Mg/Ca ratio and salinity: two controls over crystallization of dolomite",* AAPG Bulletin 59 (1975) 60–68.

[31] Budd D.A., *"Cenozoic dolomites of carbonate islands: their attributes and origin",* Earth-Science Reviews 42 (1997) 1–47.

[32] Kırmacı M.Z., Akdağ K., *"Origin of dolomite in the Late Cretaceous–Paleocene limestone turbidites, eastern Pontides, Turkey",* Sedimentary Geology 181 (2005) 39–57.

[33] Hood S.D., Nelson C.S., Kamp P.J., *"Burial dolomitisation in a non-tropical carbonate petroleum reservoir: the Oligocene Tikorangi Formation, Taranaki Basin, New Zealand",* Sedimentary Geology 172 (2004) 117–138.

[34] Rahimi A., Adabi M.H., Aghanabati A., Majidifard M.R., Jamali A.M., *"Dolomitization mechanism based on petrography and geochemistry in the Shotori Formation (Middle Triassic), Central Iran",* Open Journal of Geology 6 (2016) 1149–1168.

[35] Barnaby R.J., Read J.F., *"Dolomitization of a carbonate platform during late burial; Lower to Middle Cambrian Shady Dolomite, Virginia Appalachians",* Journal of Sedimentary Research 62 (1992) 1023–1043.

[36] Zhang S., Lv, Z., Wen, Y., Liu, S., *"Origins and geochemistry of dolomites and their dissolution in the middle Triassic Leikoupo formation, western Sichuan Basin, China",* Minerals 8 (2018) 289.

[37] Warren J., *"Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations",* Earth-Science Reviews. 52 (2000) 1–81.

[38] Wen H., Wen L., Chen H., Zheng R., Dang L., Li Y., *"Geochemical characteristics and diagenetic fluids of dolomite reservoirs in the Huanglong Formation, Eastern Sichuan Basin, China",* Petroleum Science 11 (2014) 52–66.

[39] Zamani F., Moussavi-Harami S.R., Zand-Moghadam H., Mahboubi A., *"Petrography and geochemistry of carbonate hosted-rock in the Karavangah and Dehno Pb-Zn mines at the north*

[44] Wu T., Huang Z., He Y., Yang M., Fan H., Wei C., Ye L., Hu Y., Xiang Z., Lai C., *"Metal source and ore-forming process of the Maoping carbonate-hosted Pb-Zn deposit in Yunnan, SW China: Evidence from deposit geology and sphalerite Pb-Zn-Cd isotopes",* Ore Geology Reviews (2021) 104214.

[45] Wei C., Ye L., Hu Y., Huang Z., Danyushevsky L., Wang H., *"LA-ICP-MS analyses of trace elements in base metal sulfides from carbonate-hosted Zn-Pb deposits, South China: A case study of the Maoping deposit",* Ore Geology Reviews 130 (2021) 103945. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103945.

[46] Hu Y., Wei C., Ye L., Huang Z., Danyushevsky L., Wang, H., *"LA-ICP-MS sphalerite and galena trace element chemistry and mineralization-style fingerprinting for carbonate-hosted Pb-Zn deposits: Perspective from early Devonian Huodehong deposit in Yunnan, South China",* Ore Geology Reviews 136 (2021) 104253. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev 2021.104253.

of Kuhbanan, Kerman", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 28 (2020) 507–526. https://doi.org/10.29252/ijcm.28.2.507.

[40] Bazargani-Guilani K., Mehrabi B., Rabiee M., *"Effects of carbonate host rock on Pb-Zn mineralization in NW of Shahmirzad, Central Alborz, Iran",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 18 (2010) 53–66.

[41] Karimpour M.H., Malekzadeh Shafaroudi A., Esmaeili, S.A., Shabani S., *"Mineralogy and geochemical varations of altered host rock in Irankuh Pb-Zn mining district, SW Isfahan",* Journal of Advanced Applied Geology 8 (2019) 1–16.

[42] Ghasemi M., Mohammadzadeh M., Yaghubpur A., Mirshokraei A.A., *"Mineralogy and Textural Studies of Mehdiabad Zinc-Lead Deposit- Yazd, Central Iran",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 16 (2008) 389–404.

[43] Maghfouri S., Hosseinzadeh M.R., Rajabi A., Azimzadeh A.M., *"Darreh-Zanjir deposit; a typical carbonate hosted Zn-Pb deposit (MVT) in Early Cretaceous sedimentary sequence, Southern Yazd basin",* Geosciences 26 (2017) 13–28.